

# Kurzfassung

Finite-Elemente-Simulationen des Vortriebs *tiefliegender Tunnel* ermöglichen es, die während des Vortriebsprozesses auftretenden Verformungen zu prognostizieren, die erforderlichen Stützmittel zu dimensionieren und kritische Situationen nahe dem Versagenszustand zu erkennen. Für die Prognosefähigkeit wichtige Einflussfaktoren sind dabei die konstitutiven Gesetze der beteiligten Materialien, wie beispielsweise des Gebirges.

Fokus der Untersuchungen ist das von UNTEREGGER u. a. (2015) entwickelte isotrope *Schädigungs-Plastizitäts-Modell für Intaktgestein und Gebirge* (RDP-Modell), welches um eine fortschrittliche Regularisierungsmethode erweitert wird. Das RDP-Modell berücksichtigt lineare Elastizität und Plastizität mit dem Versagenskriterium nach HOEK-BROWN sowie verfestigendes und entfestigendes Materialverhalten, letzteres basierend auf der Kontinuumsschädigungstheorie. Die erforderlichen Materialparameter für Intaktgestein können anhand von Laborversuchen bestimmt werden. Die Erweiterung auf das Materialverhalten von Gebirge erfolgt mit einem *isotropen äquivalenten Kontinuumsmodell*, welches die Einflüsse von Diskontinuitäten auf das mechanische Verhalten durch empirische Beziehungen abhängig von geologischen Parametern berücksichtigt.

In der vorliegenden Arbeit wird ein *Finite-Elemente-Modell* entwickelt, welches den Vortrieb eines tiefliegenden Tunnels abbildet. Darin wird ein in Innsbrucker Quartzphyllit gelegener Abschnitt des Brenner Basistunnels untersucht, welcher mittels konventionellem Sprengvortrieb hergestellt wurde. Während des Vortriebs wurden triaxiale Kompressionsversuche an Gesteinsproben und Verschiebungsmessungen durchgeführt.

Für die Bewertung des RDP-Modells wird eine umfangreiche numerische Studie des Tunnelabschnitts präsentiert. Des Weiteren erfolgt der Vergleich mit elasto-plastischen Gebirgsmodellen mit dem Versagenskriterium nach HOEK-BROWN. Basierend auf dem RDP-Modell werden mit beginnender Schädigung des Gebirges größere Verformungen und die *Lokalisierung der Verformungen* in Scherbändern in unmittelbarer Hohlräumnähe prognostiziert. Dadurch ist es möglich, den Übergang von einem Quasi-Kontinuum zu einem Quasi-Diskontinuum zu beschreiben, was einen Indikator für mögliches Versagen darstellt. Zusammen mit der Anwendung eines fortschrittlichen Materialmodells für Spritzbeton wird eine gute Übereinstimmung der berechneten Verschiebungen mit den Messdaten erzielt.

In den durchgeführten Tunnelsimulationen zeigt sich eine komplexe Verteilung der geschädigten Zonen im Gebirge, weshalb das Entfestigungsverhalten des RDP-Modells detaillierter untersucht wird. Um in diesem Zusammenhang netzunabhängige Ergebnisse zu erhalten, wird ein geeignetes Regularisierungsverfahren des RDP-Modells, welches auf der *impliziten Gradientenerweiterung* der Schädigungsformulierung basiert, präsentiert. Mittels des gradientenerweiterten RDP-Modells ist es möglich, das mechanische Verhalten sowohl objektiv bezüglich der Finite-Elemente-Diskretisierung als auch realistisch gegenüber Messdaten abzubilden. Diese entscheidenden Kriterien werden anhand von Simulationen von Keilsplattversuchen, triaxialen Kompressions- und Extensionsversuchen sowie des Ausbruchs des Tunnelabschnitts untersucht.

# Abstract

Finite element simulations of the construction of a *deep tunnel* enable to predict the deformations occurring during the excavation process, to dimension the required tunnel support and to determine critical situations close to collapse. In terms of their predictive capacity, they strongly rely on the constitutive relations of the materials involved such as the surrounding rock mass.

A recently proposed isotropic *rock damage-plasticity model* (RDP model) by UNTEREGGER et al. (2015) is evaluated and enhanced by an advanced regularization technique. The RDP model includes linear elastic behavior, non-associated plastic flow with the failure criterion of HOEK-BROWN and is superior to commonly employed elastic-plastic rock models by considering pressure-dependent strain hardening and strain softening, the latter by means of damage mechanics. The required material parameters for intact rock may be determined based on laboratory tests on rock specimens. Rock mass is modeled as an *isotropic equivalent continuum*, considering the influence of discontinuities on the mechanical behavior by means of empirical relations based on two geological parameters.

A *finite element model* of the construction of a deep tunnel is developed. In particular, a stretch of the Brenner Base Tunnel is considered, surrounded by Innsbruck quartz phyllite rock mass and constructed by a drill, blast and secure procedure. It is considered as a benchmark. During the construction of the benchmark tunnel, data from triaxial compression tests on intact rock samples and displacement measurements were recorded.

For assessing the RDP model, a comprehensive study of the benchmark tunnel is presented including a comparison with selected elastic-plastic rock models with the HOEK-BROWN failure criterion. On the basis of the RDP model larger deformations from the onset of damage are predicted, accompanied by *localization of deformations* into distinct shear bands in the vicinity of the tunnel. Thus, the transition from quasi-continuous to quasi-discontinuous rock mass can be modeled. The latter may be regarded as precursor to collapse. Together with an advanced shotcrete model for the support, the displacements can be predicted in the range of the recorded ones.

Due to the complex damage pattern in the rock mass obtained in the tunneling simulations, further attention is paid to the softening formulation of the RDP model. For obtaining mesh-independent results, an appropriate regularization scheme based on the *implicit gradient-enhancement* of the damage formulation of the RDP model is presented. The capability of the gradient-enhanced RDP model for predicting an objective mechanical response with respect to the discretization and for obtaining numerical results in a realistic manner compared to measurements, is demonstrated. This is proved based on simulations of wedge splitting tests, triaxial compression and extension tests and the excavation of the benchmark tunnel.